

CONTROL MULTIVARIABLE DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE TIPO POLIMÉRICA MEDIANTE CONTROL PREDICTIVO DE MATRIZ DINÁMICA

Feroldi, Diego¹; Basualdo, Marta²; Serra, Maria¹ y Riera, Jordi¹

¹Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, C. Llorens i Artigas 4-6 planta 2,
Barcelona 08028, España, email: dferoldi@iri.upc.edu

²GIAIQ- FRRo- Universidad Tecnológica Nacional

Resumen: En este trabajo se propone resolver el control multivariable en una pila de combustible tipo PEM con los siguientes objetivos de control: *i)* regulación de la tensión producida por la pila de combustible y *ii)* regulación del exceso de oxígeno en el cátodo. La corriente requerida a la pila de combustible actúa como perturbación al sistema. La elección de los objetivos de control está motivada por dos hechos: *i)* el voltaje producido por la pila varía con la corriente consumida por la carga y *ii)* trabajar con un nivel de exceso de oxígeno adecuado mejora la eficiencia global del sistema compuesto por la pila de combustible y el compresor de aire. La tensión del compresor de aire que alimenta el cátodo es una buena variable de control, sin embargo no es suficiente para poder lograr ambos objetivos de control. Por ese motivo se propone utilizar la apertura de la válvula de salida de aire del cátodo como variable de control adicional. Se utiliza el método de Control Predictivo de Matriz Dinámica (DMC). Los resultados obtenidos muestran un control eficiente tanto en rechazo de perturbación como en el seguimiento de las consignas de las variables controladas.

Palabras claves: PEMFC, control predictivo, DMC, control multivariable

1. Introducción

Dados los problemas ambientales actuales de sobrecalentamiento del planeta debido a las emisiones de gases CO₂ y la escasez de combustible fósil prevista para las próximas décadas es importante encontrar formas más eficientes de utilización de los recursos energéticos que afecten mínimamente al medio ambiente. Las pilas de combustible son dispositivos que permiten transformar la energía química de un combustible (generalmente hidrógeno) directamente en energía eléctrica de forma eficaz y limpia. Esto las convierte en una alternativa interesante de generación de energía eléctrica en diversas aplicaciones.

La respuesta temporal de la reacción electroquímica que tiene lugar en la pila de combustible es muy rápida. Sin embargo, la respuesta temporal de la potencia generada por una pila de combustible está limitada por el flujo de aire y de combustible, la regulación de la presión del aire, la gestión del agua en el interior de la pila y el calor generado [1]. Cuando la corriente demandada a la pila aumenta rápidamente, el nivel de oxígeno presente en el cátodo baja drásticamente como resultado de la reacción electroquímica. Esto provoca una disminución en el voltaje generado con el consiguiente descenso de la eficiencia del sistema. Además puede provocar daños a la membrana. Este fenómeno es conocido como “*oxygen starvation*”. Se define un parámetro indicador del exceso de oxígeno en el cátodo [2], [3], [4]:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,ent}}{W_{O_2,rcr}} \quad (1)$$

donde $W_{O_2,ent}$ es el flujo de oxígeno que ingresa al cátodo y $W_{O_2,rcr}$ es el flujo de oxígeno que reacciona en el cátodo. La velocidad de reacción del oxígeno depende de la corriente demandada por la pila, I_{PC} :

$$W_{O_2,rcr} = M_{O_2} \frac{nI_{PC}}{4F} \quad (2)$$

donde M_{O_2} es la masa molar del oxígeno, n es el número de celdas de la pila de combustible y F es el número de Faraday ($F=96485$ Coulombs). Por lo tanto cuando la corriente demandada por la pila aumenta, el valor de λ_{O_2} disminuye instantáneamente. Es necesario implementar una estrategia de control que permita una rápida recuperación del nivel de oxígeno.

En [2] se demuestra la conveniencia de regular la proporción de oxígeno en exceso en el cátodo con el fin de maximizar la potencia neta generada. En [2], [3] y [4] el control de la proporción de exceso de oxígeno en cátodo se aborda ajustando la inyección de aire mediante la manipulación de la tensión del motor del compresor de aire. En [2] y [3] se resuelve el problema mediante un control de tipo “*feedforward*” mientras que en [4] y [5] se emplea control predictivo basado en modelo (MPC). Queda demostrado que existe un severo conflicto entre el control de la proporción de oxígeno en exceso en el cátodo y la respuesta temporal de la potencia neta si no se emplea ninguna fuente de potencia secundaria en los momentos de cambio brusco en la potencia demandada. Esta limitación proviene del hecho de que toda la potencia del compresor de aire proviene de la propia pila de combustible. En [4] se agregan supercapacitores al sistema como fuente de potencia auxiliar para afrontar los picos de potencia.

En el presente trabajo se implementa un control multivariable teniendo como objetivos de control la regulación del voltaje generado y el suministro de oxígeno en el cátodo para superar el problema mencionado. Por ello, además de utilizar la tensión del motor del compresor, se propone utilizar la apertura de la válvula de salida del aire del cátodo. El método de control empleado es el Control Predictivo de Matriz Dinámica (DMC). Este es uno de los métodos más representativos dentro del control predictivo y está ampliamente introducido en la industria [6]. La elección del método de control está justificada fundamentalmente por el hecho de poder lograr un control multivariable centralizado de la pila de combustible, donde el modelo utilizado, además de ser fácilmente elaborado, permite tener en cuenta las interacciones existentes entre las entradas y salidas del sistema como se explicará a posteriori. Otra ventaja de su utilización es el esfuerzo de cálculo reducido para computar el vector de control.

2. Método de cálculo

El método de Control de Matriz Dinámica (DMC) [6], usa la respuesta al escalón para modelar el proceso, considerando solo las N primeras muestras hasta que la respuesta tiende a un valor constante, asumiendo por tanto que el proceso es asintóticamente estable. Como se utiliza un modelo de respuesta ante escalón :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (3)$$

los valores predichos resultan:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t+k|t) \quad (4)$$

En cuanto a las perturbaciones, se considera que su valor permanece constante e igual al existente en el instante actual durante todo el horizonte, esto es, igual al valor medido de la salida (y_m) menos el estimado por el modelo $\hat{y}(t|t)$:

$$\hat{n}(t+k|t) = \hat{n}(t|t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (5)$$

Por lo tanto:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + f(t+k) \quad (6)$$

Donde $f(t+k)$ es la respuesta libre del proceso, es decir, la parte de la respuesta debida a las acciones de control previas, y viene dada por:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (7)$$

Si el proceso es asintóticamente estable, los coeficientes g_i de la respuesta ante el escalón tienden a un valor constante después de N periodos de muestreo, por lo que puede considerarse que $g_{k+i} - g_i \approx 0$ si $i > N$ y por lo tanto la respuesta libre puede calcularse como:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (8)$$

Las predicciones pueden calcularse a lo largo del horizonte de predicción ($k=1, \dots, p$), considerando m acciones de control:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1|t) &= g_1 \Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2|t) &= g_2 \Delta u(t) + g_1 \Delta u(t+1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+p|t) &= \sum_{i=1}^m g_i \Delta u(t+p-i) + f(t+p) \end{aligned} \quad (9)$$

Si se define la matriz dinámica G como:

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

puede escribirse:

$$\hat{y} = Gu + f \quad (11)$$

El objetivo del controlador DMC es minimizar la diferencia entre las consignas, $w(t)$, y las salidas reales de la planta en el sentido de mínimos cuadrados con la posibilidad de incluir una penalización en la amplitud de los movimientos de la señal de control.

$$J = \sum_{j=1}^p R [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m Q [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (12)$$

Las matrices R y Q son de dimensión $2p \times 2p$ y $2m \times 2m$ respectivamente. Con la matriz R pueden compensarse los diferentes rangos de valores de las salidas de la planta, mientras que la matriz Q permite dar distintos pesos a las diferentes señales de control. Si no existen restricciones en las variables manipuladas, la minimización de la función de coste J puede realizarse igualando su derivada a cero, resultando:

$$u = (G^T R G + Q)^{-1} G^T R (w - f) \quad (13)$$

Como en todas las estrategias de control predictivo, solo se envía a la planta el primer elemento del vector calculado, calculándose nuevamente la secuencia de control en la siguiente iteración.

Como se mencionó anteriormente, los dos objetivos de control propuestos en este trabajo son regular la tensión generada por la pila de combustible, V_{pc} , y el suministro de oxígeno en el cátodo de la misma, λ_{O_2} . Las variables controladas son entonces: $y_1 = \lambda_{O_2}$, e $y_2 = V_{pc}$. La corriente requerida a la pila de combustible, $w = I_{pc}$, se considera perturbación al sistema.

La tensión del compresor de aire que alimenta el cátodo, V_{cm} , es una buena variable de control, sin embargo no es suficiente para poder lograr ambos objetivos de control. Por ese motivo se propone utilizar la apertura de la válvula de salida de aire del cátodo, A_t , como variable de control adicional. Las variables manipuladas son entonces: $u_1 = V_{cm}$, y $u_2 = A_t$. Existe gran interacción entre las variables manipuladas y las variables controladas [7], lo cual dificulta la realización de un control descentralizado del sistema. El controlador multivariable implementado emplea en su algoritmo de control una matriz dinámica ampliada que tiene en cuenta dichas interacciones:

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \quad (14)$$

donde cada matriz G_{ij} contiene los coeficientes de la i -ésima respuesta escalón ante la j -ésima entrada. Las matrices R y Q tienen ahora la siguiente forma:

$$R = \begin{pmatrix} R_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_2 \end{pmatrix}; \quad Q = \begin{pmatrix} Q_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Q_2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

donde las R_i y las Q_i son matrices diagonales de dimensión $p \times p$ y $m \times m$ respectivamente. De esta manera se ha conseguido un controlador multivariable centralizado que tiene en cuenta las interacciones entre las variables controladas y manipuladas.

3. Resultados y discusión

El controlador DMC fue implementado en el entorno de Matlab y ensayado con el modelo dinámico no lineal de pila de combustible propuesto por Pukrushpan et al. [3], el cual representa un sistema de generación con pila de combustible PEM de 75kW de potencia. Este modelo caracteriza al sistema completo teniendo en cuenta la dinámica del compresor y la dinámica de llenado de cátodo y ánodo. El modelo no tiene en cuenta tanto la dinámica de la reacción electroquímica como la dinámica de efecto eléctrico por ser extremadamente rápidas. El punto de operación utilizado es el correspondiente a 40kW.

En el controlador se ajustó el horizonte de control m igual a 15 y el horizonte de predicción p igual a 100. Las matrices R y Q del controlador se ajustaron para lograr una respuesta temporal adecuada del sistema. Los valores de las matrices R y Q influyen en la respuesta

temporal obtenida, especialmente la matriz de pesos Q que reduce el esfuerzo de control. Cuanto más grande sean los valores de Q , tanto menor será el esfuerzo de control pero, en contrapartida, el tiempo de respuesta será mayor. En la Fig. 1. se muestra la respuesta obtenida con los siguientes valores:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 5 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 5 \end{pmatrix}; \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}; \quad Q_1 = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}; \quad Q_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0.5 \end{pmatrix}$$

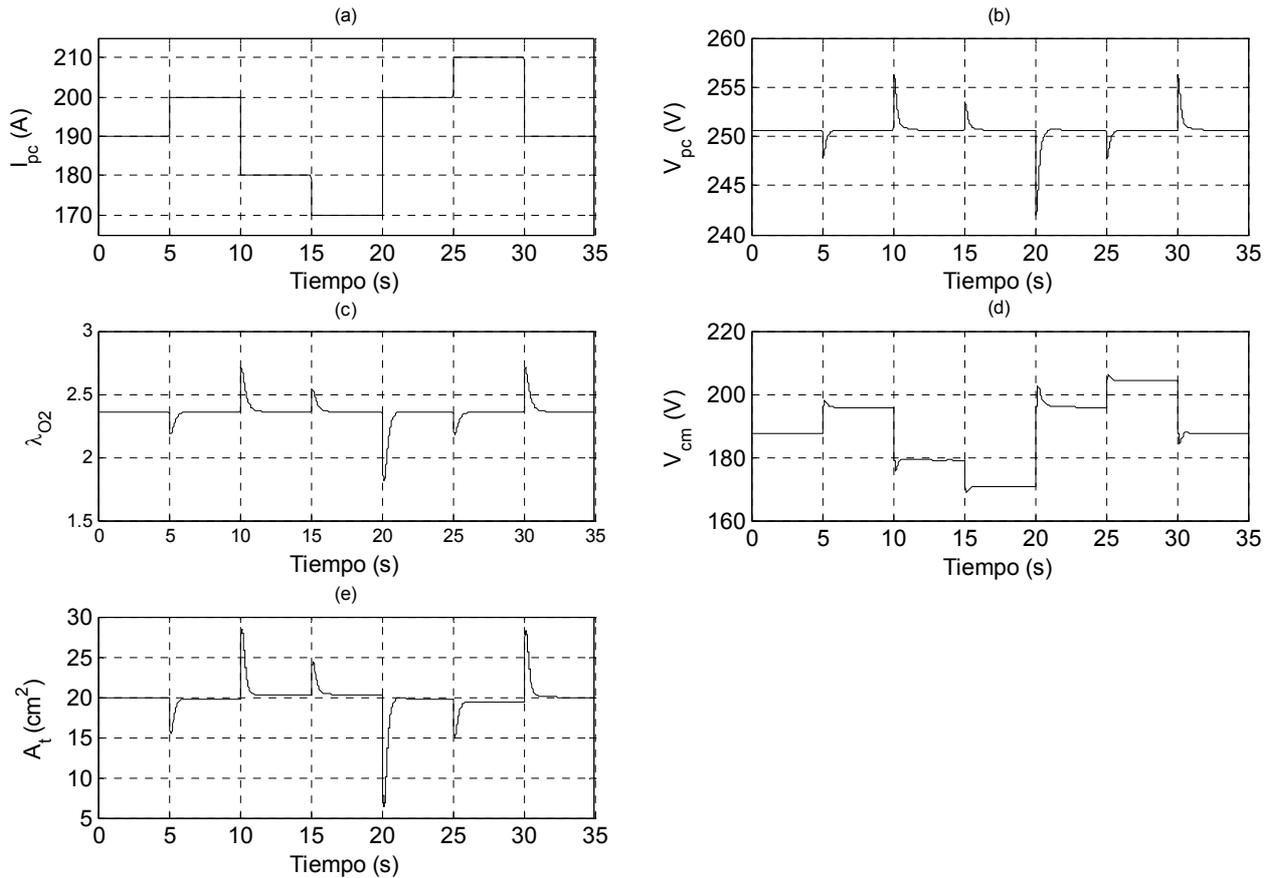


Fig. 1. (a) Variación temporal de la corriente de carga; (b) tensión generada por la pila de combustible; (c) proporción de oxígeno en exceso; (d) acción de control sobre la tensión de compresor; (e) acción de control sobre la apertura de la válvula de cátodo.

Las variables controladas tienen un inevitable sobrepico debido a que la reacción electroquímica tiene una velocidad muy alta. Sin embargo, el funcionamiento del controlador implementado tiene un buen rechazo a las perturbaciones, con tiempo de respuesta menor a 0.5 segundos en V_{pc} y menor a 1 segundo en λ_{O_2} .

En cambio, si se aumenta el valor de las matrices Q :

$$Q_1 = \begin{pmatrix} 5 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 5 \end{pmatrix}; \quad Q_2 = \begin{pmatrix} 2.5 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2.5 \end{pmatrix}$$

la respuesta temporal de las variables controladas se modifica, aumentando el tiempo de respuesta de las mismas, Fig. 2. Con este nuevo ajuste se obtienen tiempos de respuesta mayores, de aproximadamente 1 segundo en V_{pc} y 1.5 segundos en λ_{O_2} . En contrapartida, los esfuerzos de control son menores.

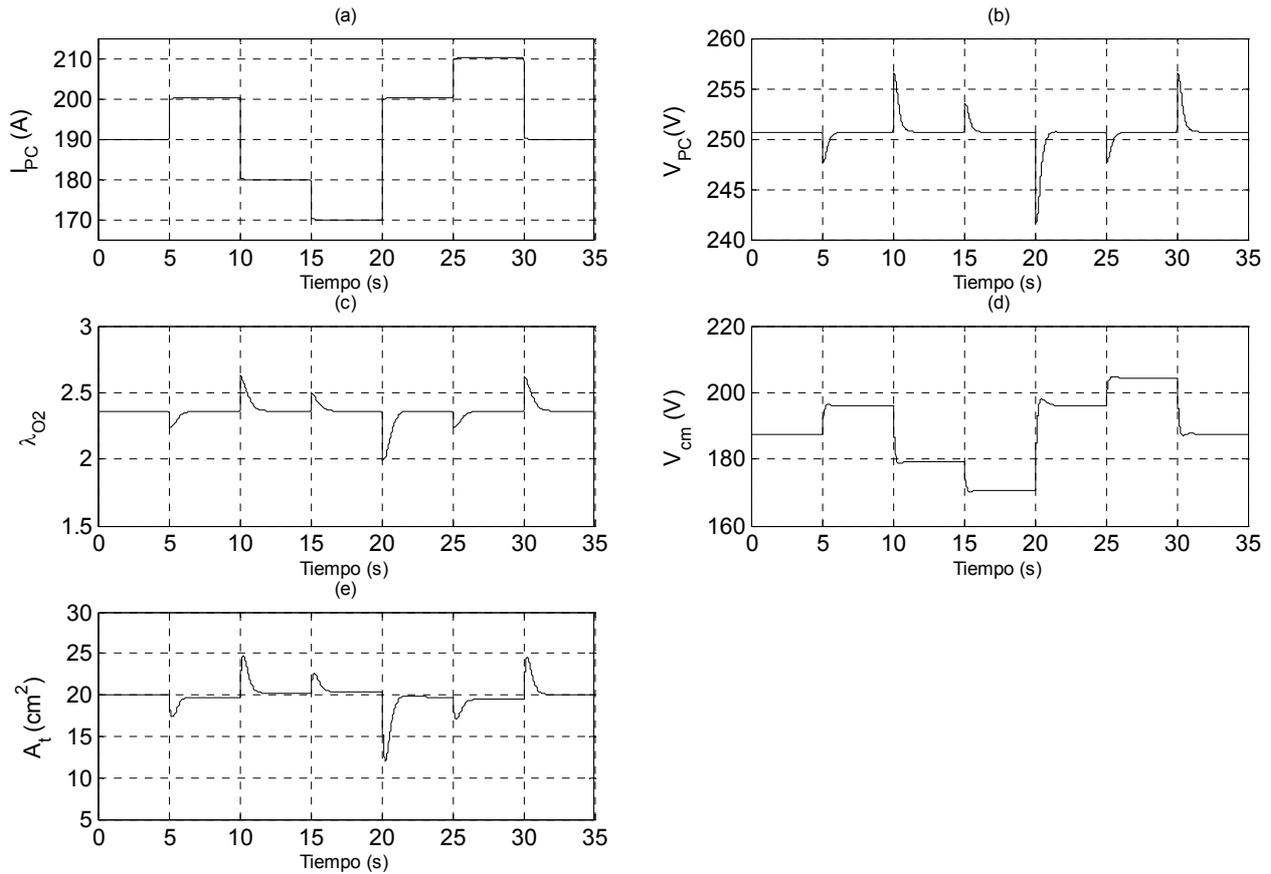


Fig. 2. (a) Variación temporal de la corriente de carga; (b) tensión generada por la pila de combustible; (c) proporción de oxígeno en exceso; (d) acción de control sobre la tensión de compresor; (e) acción de control sobre la apertura de la válvula de cátodo.

En el algoritmo de control se implementa un mecanismo de compensación para subsanar los inevitables errores de modelado y poder trabajar adecuadamente frente a perturbaciones no medidas. Este mecanismo de compensación utiliza información del valor real de las variables controladas y asegura error estacionario nulo. Parte del supuesto que las variables controladas pueden ser medidas, por lo tanto en aquellos casos en que alguna de las mediciones no sea posible será más crítica la etapa de identificación.

A pesar del hecho de que el modelo interno utilizado por el controlador es un modelo lineal del sistema, los resultados muestran un buen comportamiento en un amplio entorno alrededor del punto de operación seleccionado.

4. Conclusiones

Se ha implementado un control multivariable en un sistema de generación eléctrico con pila de combustible tipo PEM utilizando Control Predictivo de Matriz Dinámica. El método utilizado logra un control eficiente de las variables de salidas controladas que soluciona el problema de interacción presente entre las variables controladas y las manipuladas.

Los objetivos de control han sido alcanzados con un esfuerzo de control reducido y acotable mediante la matriz de pesos Q . Esto es particularmente importante debido a la limitación física en la operación de la válvula de salida de cátodo.

El tipo de modelo interno utilizado por el controlador es de fácil obtención experimental y permite además aumentar la cantidad de variables controladas de manera ágil.

Los resultados obtenidos mediante simulación se validarán experimentalmente en laboratorio.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT DPI2004-06871-C02-01, del MEC español.

6. Referencias

- [1] M. Yang, B. Bates, N. Fletcher y R. Pow; *Fuel Cell Technology for Vehicles (SAE)*, 249-256 (1998)
- [2] M. Grujicic, K. Chittajallu, E. Law, J. Pukrushpan, *Journal of Power and Energy*, 218, 487-499, (2004)
- [3] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng, *IEEE Control Systems Magazine*, 24, 30-46, April 2004
- [4] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, H. Peng, *Proceedings of the American Control Conference*, 1, 834-839, (2004)
- [5] J. Golbert, y D. Lewin; *J. of Power Sources*, 135, 135-151, (2004)
- [6] E. Camacho y C. Bordons, en *Model Predictive Control*, M. Grimbale y M. Johnson (Editores), Springer-Verlag: Londres, 1999, 33-39.
- [7] M. Serra, J. Aguado, X. Ansede y J. Riera; *J. of Power Sources*, 151, 93-102, (2005)